

## MOTS CLES

Gisement du CO<sub>2</sub>  
en 2050 (France)

Certificats  
d'Economies  
d'Energie

Prix du CO<sub>2</sub> des  
actions de  
rénovation  
énergétique

## MODELISATION DU PRIX DU CO<sub>2</sub> DES ACTIONS DE RENOVATION ENERGETIQUE DANS LE BATIMENT RESIDENTIEL EN FRANCE METROPOLITAINE

Asma REMKI

.....  
La question des économies d'énergie occupe une place centrale dans le débat public en France. L'investissement rentable dans les technologies efficaces en énergie (Isolation, équipements...) permet de réduire les dépenses publiques, la dépendance du pays aux importations et diminue les émissions anthropiques des gaz à effet de serre à l'origine du changement climatique. Le bâtiment représente un gisement important d'économies d'énergie, c'est pourquoi le Grenelle de l'environnement fixe comme objectif la réduction de 38 % la consommation d'énergie dans le bâtiment en 2020. Divers mécanismes ont été mis en place par les pouvoirs publics pour atteindre cet objectif, comme le Crédit d'Impôt pour la Transition Energétique (CITE), les prêts bonifiés, la taxe carbone, la Réglementation Thermique (RT) et les Certificats d'Economies d'Energie (CEE). Dans la présente étude, l'intérêt est focalisé sur le dispositif des CEE introduit par la loi POPE (Programmation fixant les Orientations de la Politique Energétique) en 2005 et qui impose une obligation d'économies d'énergie aux fournisseurs d'énergie. L'objectif est d'évaluer le coût de la réduction de CO<sub>2</sub> des principales actions de rénovation énergétique liées aux CEE dans le bâtiment résidentiel.

Les émissions moyennes évitées par chaque action de rénovation basée sur les estimations des économies d'énergie du dispositif CEE seront tout d'abord approchées. Une simulation du « gisement » d'économies de CO<sub>2</sub> en 2050 au niveau national en fonction d'un certain nombre d'hypothèses issues d'enquêtes d'EDF sur les économies réalisées lors de programmes régionaux d'efficacité énergétique sera proposée. L'étude plaide en faveur d'une attention à porter aux actions les plus rentables en termes d'économies d'émissions de CO<sub>2</sub>.

.....

## Table des matières

Introduction générale.....	3
1. Périmètre et cadre de l'étude .....	4
2. Le potentiel en CO <sub>2</sub> des actions de rénovation énergétique dans le bâtiment résidentiel .....	5
2.1 Estimation du gain en CO <sub>2</sub> des actions de rénovation énergétique.....	5
2.2 Simulation du Prix du CO <sub>2</sub> dans les actions de rénovation énergétique .....	7
3. Aperçu sur les courbes des coûts d'abattement.....	9
4. Modélisation du potentiel du CO <sub>2</sub> en 2050 tenant compte des moyennes d'économie d'énergie estimées par le dispositif CEE.....	11
4.1 Hypothèses .....	11
4.2 Résultats .....	12
5. Modélisation du gisement en CO <sub>2</sub> prenant en compte l'hétérogénéité des économies d'énergie réalisées.....	14
5.1 Hypothèses .....	15
5.2 Méthodologie.....	16
5.3 Résultats .....	17
6. Discussion .....	19
Conclusion générale.....	20
Bibliographie.....	22

## Introduction générale

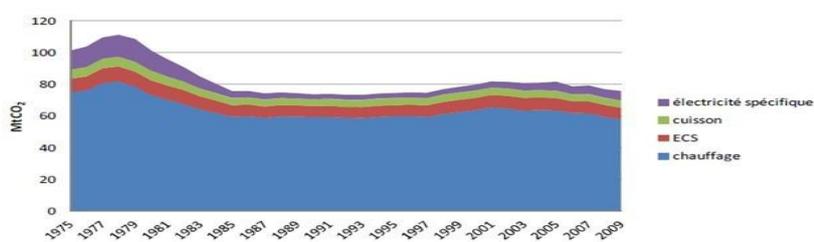
L'un des enjeux politiques de la Commission Européenne est d'engager l'Europe dans un nouveau modèle énergétique. Le paquet Energie-Climat (« 3 x 20 % ») a fixé des objectifs précis en termes d'émission de gaz à effet de serre et de réduction de la dépendance et des consommations énergétiques. Les objectifs européens d'efficacité énergétique conjugués à la réduction des émissions de gaz à effet de serre et de la consommation d'énergie ont laissé à chaque pays membre l'opportunité de les interpréter selon sa logique institutionnelle. Certains Etats ont adopté un régime de « Certificats d'Economies d'Energie » (CEE) qui est un mécanisme imposant des obligations de réduction des consommations d'énergie aux énergéticiens. L'idée est de pousser les acteurs à mobiliser des ressources pour exploiter le gisement important d'économies d'énergie dans les secteurs à forte consommation énergétique.

En France, le dispositif CEE ou « certificats blancs » a été introduit par la loi POPE en 2005. Il impose aux fournisseurs d'énergie (appelés « les obligés ») de réaliser des économies d'énergie dans le secteur du bâtiment, de l'industrie, des réseaux, des transports ou de l'agriculture par rapport au niveau de performance minimum imposé par la réglementation en vigueur en France ou en Europe. Dans les faits, 70 % du volume total des CEE a été produit dans le secteur du bâtiment résidentiel, principalement par l'installation d'équipements thermiques performants. Dans la présente étude, l'objet est de mesurer le bilan des principales actions de rénovation du dispositif CEE en deuxième période (2011 – 2013<sup>1</sup>) en termes de CO<sub>2</sub> évité ainsi que les gisements associés dans le seul secteur résidentiel.

Le secteur du bâtiment constitue un levier important pour la réduction des émissions de CO<sub>2</sub>. Il est le premier secteur consommateur d'énergie, avec en moyenne 70 millions de tonne équivalent pétrole (tep) consommées par an. Cela représente plus de 40 % de l'énergie finale nationale consommée. Le parc résidentiel quant à lui représente environ deux tiers de l'ensemble des bâtiments et il est le deuxième secteur émetteur de CO<sub>2</sub> après le transport (émissions directes et indirectes). La plus grande part des émissions de CO<sub>2</sub> dans le secteur résidentiel est liée au chauffage (66 % des consommations énergétiques (Wing et al, 2015)). Son énergie principale est le gaz (49 %) qui représente également 35 % du mix énergétique pour l'eau chaude sanitaire, et 43 % pour la cuisson.

Historiquement, la réduction des besoins énergétiques et la diffusion d'équipements performants dans le secteur résidentiel a permis de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> malgré l'augmentation du nombre de logements. La première baisse globale est notable à partir de la fin des années 1970 et la seconde seulement depuis les années 2000 (figure 1).

Figure 1 : Emissions de CO<sub>2</sub> du secteur résidentiel par usage en France



Source : CEREN 2011

<sup>1</sup> Une obligation triennale de réalisation d'économies d'énergie, calculée en fonction du prix TTC des énergies et des volumes de vente en kWh.

Des politiques publiques ont été adoptées depuis les années 1970 notamment la RT (Réglementation Thermique) qui impose des critères de performance spécifiques à la construction des logements neufs et à la rénovation des logements existants. Par ailleurs, le programme nucléaire français de production d'électricité a exprimé la volonté de l'Etat d'opter pour une politique assurant une indépendance énergétique vis-à-vis des énergies fossiles. Cette politique a aussi favorisé le développement industriel d'équipements consommant de l'électricité pour des usages très majoritairement satisfaits à partir d'énergie fossile avant les années 1970 (les usages thermiques, en particulier l'eau chaude sanitaire et chauffage), ce qui, par ailleurs, a permis de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> par équipement.

De plus, le troisième choc pétrolier ainsi que la prise de conscience des enjeux climatiques ont poussé à la mise en place d'aides publiques pour les bâtiments existants, notamment le Crédit d'Impôt pour la Transition Energétique (CITE), anciennement appelé le Crédit d'Impôt pour le Développement Durable (CIDD), en 2005, proposant un remboursement d'une part de l'investissement des rénovations énergétiques performantes (Nauleau M-L, 2015).

L'objectif de l'étude est de proposer une méthodologie de calcul des coûts marginaux d'abattement<sup>2</sup> des actions de rénovation énergétique dans les logements afin de proposer par la suite, une orientation des choix de politique publique vers les mesures ayant le plus faible coût de la tonne de CO<sub>2</sub> économisée.

Dans un premier lieu, les gains moyens en CO<sub>2</sub> résultant des principales actions de rénovation énergétique éligibles aux CEE seront estimés. Le but est d'exprimer un *Merit Order* en fonction du prix du CO<sub>2</sub> de ces actions. Les courbes des coûts d'abattement relatives au potentiel d'économies en CO<sub>2</sub> de l'ensemble du parc à l'horizon 2050 seront estimées sous réserve de deux principales hypothèses :

- Dans un premier temps, la première hypothèse porte sur la conformité entre la moyenne des économies d'énergie réalisées au niveau national et les évaluations données par les « fiches d'opération standardisées<sup>3</sup> » du dispositif CEE.
- Dans un second temps, la distribution des économies d'énergie au niveau national sera estimée en se basant sur des enquêtes d'EDF sur la variabilité des économies des ménages après travaux de rénovation énergétique en région (Raynaud, M., 2014).

## 1. Périmètre et cadre de l'étude

L'objectif est de développer une méthodologie pour connaître le potentiel de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> et les coûts associés dans le bâtiment résidentiel.

Dans le cadre de cette étude, onze opérations résidentielles sous forme de fiches standardisées ont été retenues dont quatre concernent les parois du bâtiment et sept des

---

<sup>2</sup> Le « coût d'abattement » (en €/tCO<sub>2</sub>éq) d'une tonne de CO<sub>2</sub> grâce à une action donnée est défini comme le coût de l'action de réduction rapporté à la quantité d'émission de CO<sub>2</sub> « abattue » (diminuée ou évitée selon les cas) grâce à cette action. Le coût marginal est le coût d'abattement de la dernière tonne nécessaire pour atteindre un objectif donné.

<sup>3</sup> La production des CEE est l'un des choix des obligés pour accomplir leurs obligations. Trois types d'actions permettent de demander les CEE auprès du PNCEE (Pole National des Certificats d'Economies d'Energie), les opérations standardisées, les programmes d'accompagnement et les mesures spécifiques. Les opérations standardisées représentent 93 % du volume total des CEE délivrés depuis le début du dispositif (765 TWh cumac au 31 juillet 2015) (DGEC, 2015). Chaque type d'opération standardisée fait l'objet d'une fiche technique officielle donnant une évaluation forfaitaire de l'économie d'énergie correspondante.

équipements thermiques. L'ensemble de ces opérations représente 80 % (276,24 TWh) d'énergie valorisée en kWh cumac réalisées en 2012 dans le bâtiment résidentiel<sup>4</sup>.

Table 1 : les principales actions de rénovation du dispositif des CEE dans le bâtiment résidentiel (2006-2013)

<b>Enveloppe</b>		<b>% kWh cumac<sup>5</sup></b>
BAR-EN-01	Isolation de combles ou de toiture	9,40
BAR-EN-02	Isolation des murs	7,55
BAR-EN-04	Fenêtre ou porte fenêtre complète avec vitrage	3,72
<b>Appareils thermiques</b>		
BAR-TH-01	Chauffe-eau solaire individuel	Nd
BAR-TH-04	Pompe à chaleur de type air/eau	Nd
BAR-TH-06	Chaudière individuelle de type condensation	13,14
BAR-TH-07	Chaudière collective de type condensation	5,63
BAR-TH-08	Chaudière individuelle basse température	3,66
BAR-TH-12	Appareils indépendants de chauffage au bois	Nd
BAR-TH-29	Pompe à chaleur de type air/air	Nd
BAR-TH-48	Chauffe-eau thermodynamique individuel à accumulation	Nd

Source : (Xu, X. et al, 2014 ; DGEC, 2015)

La première partie de l'étude présente la traduction des économies d'énergies estimées par les fiches CEE (table 1) en CO<sub>2</sub>, ensuite, la deuxième et la troisième partie livrent une modélisation des MACC (*Marginal Abatement Cost Curve*) sous réserve d'un certain nombre d'hypothèse détaillées ci-dessous. Le prix du CO<sub>2</sub> sera simulé dans la première partie en fonction de la moyenne des économies d'énergie estimée par le dispositif CEE. Dans la deuxième partie, une distribution réelle sera attribuée aux économies d'énergie basée sur l'hétérogénéité du comportement des ménages en PACA, Meuse, Haute-Marne et Bretagne.

## 2. Le potentiel en CO<sub>2</sub> des actions de rénovation énergétique dans le bâtiment résidentiel

### 2.1 Estimation du gain en CO<sub>2</sub> des actions de rénovation énergétique

Cette partie mesure les gains en termes de CO<sub>2</sub> évité par les principales actions du dispositif CEE durant la deuxième période. Le calcul est basé sur les valorisations prises en compte par l'ATEE (Association Technique Energie Environnement) et approuvées par l'ADEME telles qu'elles figurent dans les fiches d'opérations standardisées<sup>6</sup>.

Les hypothèses de base utilisées dans le calcul sont différentes d'une action à une autre. Pour les opérations d'isolation, la distinction se fait selon le mode de chauffage utilisé (électrique ou combustible). Tandis que pour les équipements thermiques, ce sont les équipements de rénovation existant avant la mise en place de l'action qui sont pris en

<sup>4</sup> Soit 340 TWh pour le secteur du bâtiment.

<sup>5</sup> Le kWh cumac et la tCO<sub>2</sub> cumac sont respectivement les unités d'économie d'énergie et d'émission de GES donnant droit à un certificat et actualisée au taux d'actualisation de 4 % par an et cumulés sur une durée de vie conventionnelle déterminée pour chaque action.

<sup>6</sup> <http://www.attee.fr/c2e/certificats-deconomies-denergie-fiches-batiment-residentiel>

compte<sup>7</sup>. Pour certains types d'appareils thermiques, le gain en CO<sub>2</sub> lié à des substitutions d'énergie possibles (cas des PAC (Pompe à Chaleur) air/ eau et eau/eau, chaudières à condensation et chaudière biomasse) sera ajouté :

- L'installation d'une PAC air/eau ou eau/eau vient en général (91% des cas) en remplacement d'un système à combustible (Batiprix, 2013). L'infrastructure de chauffage combustible existante dans une maison est compatible avec cette action. La référence prise en considération est le « marché du chauffage chaudière combustible » dans notre calcul.
- Les chaudières à haute performance énergétique se substituent dans la majorité des cas à des chauffages combustibles.
- Pour les chauffe-eau solaires et le chauffe-eau thermodynamique, la référence est le chauffage combustible et électrique avec des parts de marché différentes.
- Pour la PAC air/air, la situation de référence prise dans la fiche de calcul est le chauffage électrique.

Concernant les facteurs d'émission en CO<sub>2</sub> par usage, les données du dernier arrêté relatif au DPE modifiant les valeurs d'émission par kWh pour calculer l'étiquette CO<sub>2</sub> (Arrêté DPE, 2012) ont été utilisées :

- 210 gramme équivalent CO<sub>2</sub> pour le chauffage électrique,
- 234 gramme équivalent CO<sub>2</sub> pour le chauffage au gaz,
- 300 gramme équivalent CO<sub>2</sub> pour le chauffage au fioul.

Les mêmes valeurs sont prises pour l'eau chaude sanitaire, sauf pour le chauffe-eau électrique (60 gramme équivalent CO<sub>2</sub>/kWh). En outre, les données sur le mix énergétique du chauffage combustible au niveau national sont issues de l'ADEME 2010 (59 % chauffage à gaz, 36 % Fioul, 5 % GPL). Les résultats sont présentés dans le tableau 2.

Table 2 : Estimation des gains en CO<sub>2</sub> par action CEE de rénovation

Fiches Standardisées CEE		kWh cumac	Gain en tonne de CO <sub>2</sub> cumac/ unité*
<b>BAR-TH-01</b>	Chauffe-eau solaire individuel	10971	1,58
<b>BAR-TH-48</b>	Chauffe-eau thermodynamique individuel à accumulation	16297	1,92
<b>BAR-EN-04</b>	Fenêtre ou porte-fenêtre complète avec vitrage isolant	31739	7,93
<b>BAR-EN-05</b>	Isolation des toitures-terrasses	50808	12,69
<b>BAR-TH-12</b>	Appareil indépendant de chauffage au bois	52727	12,7
<b>BAR-TH-08</b>	Chaudière individuelle de type basse température	34791	13,7
<b>BAR-TH-29</b>	Pompe à chaleur de type air / air	110465	23,2
<b>BAR-TH-07</b>	Chaudière collective de type condensation	90909	27,57
<b>BAR-EN-01</b>	Isolation de combles ou de toitures	115625	28,87
<b>BAR-TH-06</b>	Chaudière individuelle de type condensation	114282	36,12
<b>BAR-EN-03</b>	Isolation d'un plancher	183865	46,24
<b>BAR-EN-02</b>	Isolation des murs	187587	46,84
<b>BAR-TH-04</b>	Pompe à chaleur de type air/eau	148453	54,02
<b>BAR-TH-03</b>	Pompe à chaleur de type eau/eau	160000	57,07
<b>BAR-TH-13</b>	Chaudière biomasse individuelle	209091	187

\*Unité : correspond à un logement moyen isolé ou à l'installation d'un système thermique par logement.

<sup>7</sup> Les gains en CO<sub>2</sub> liés aux économies d'énergie totales de l'action ont été pris en compte et pas seulement les gains marginaux qu'elle engendre en remplaçant l'équipement de base.

Le tableau 2 montre que les mesures d'isolation permettent de réaliser la plus grande part des économies de CO<sub>2</sub>. Ceci s'explique par le fait que les mesures d'isolation sont installées dans la majorité des cas (70 %) dans des logements possédant un système de chauffage combustible. C'est aussi le cas des systèmes thermiques recourant aux énergies renouvelables qui remplacent des chauffages combustibles comme les PAC air/ eau et la chaudière biomasse. De plus, ces actions réalisent des gains énergétiques (en kWh cumac) importants.

## 2.2 Simulation du Prix du CO<sub>2</sub> dans les actions de rénovation énergétique

L'objectif de cette partie est de calculer le coût de revient pour le ménage de la tonne de CO<sub>2</sub> évité pour chaque action, dans un bilan en coût global prenant en compte le coût d'investissement et les économies d'énergie cumulées, selon la formule (1) suivante :

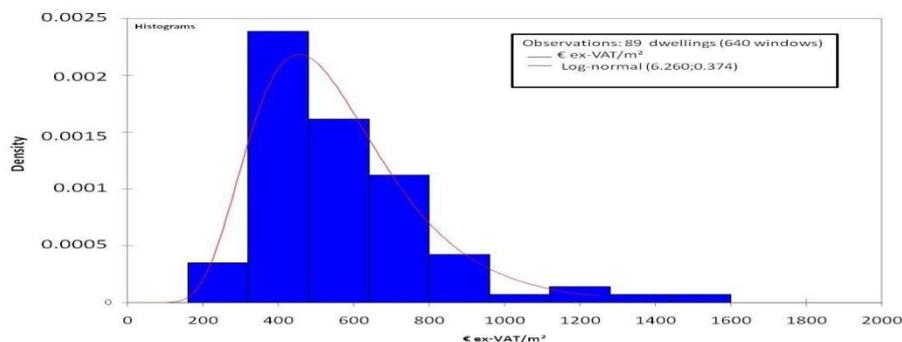
$$\text{Coût CO}_2 \text{ cumac (€/tCO}_2 \text{ cumac)} = \frac{\text{Investissement (€)} - \text{Economie d'énergie réalisée (€cumac)}}{\text{Gain en CO}_2 \text{ cumac (t CO}_2 \text{ cumac)}} \quad (1)$$

EDF R&D a pu calculer, à partir de données tirées de travaux de rénovation, la distribution statistique des coûts du kWh cumac économisé pour chaque type d'opération standardisée et nous fournir une modélisation de ces distributions (distributions log-normales).

La figure 2 illustre un exemple de la distribution des fenêtres doubles vitrages (Xu X et al, 2014).

Le coût d'investissement considéré est le coût total pour le ménage incluant le capital et les coûts secondaires ainsi que la main-d'œuvre et les coûts cachés. Il faut noter que l'approche retenue est basée sur le coût total fourni-posé associé à des économies d'énergie totale (référence au parc) telles que valorisées par le dispositif des CEE pour la deuxième période. Les incitations financières (comme le CITE) ne sont pas prises en compte dans ce calcul. Les coûts de dérangement, de transaction ou d'inconvénients annexes comme la perte de surface habitable résultant d'une isolation intérieure, non plus. Les bénéfices annexes (comme l'isolation phonique pour les doubles vitrages) ne sont pas non plus comptabilisés.

Figure 2 : la fonction de densité du coût d'investissement des fenêtres doubles vitrages

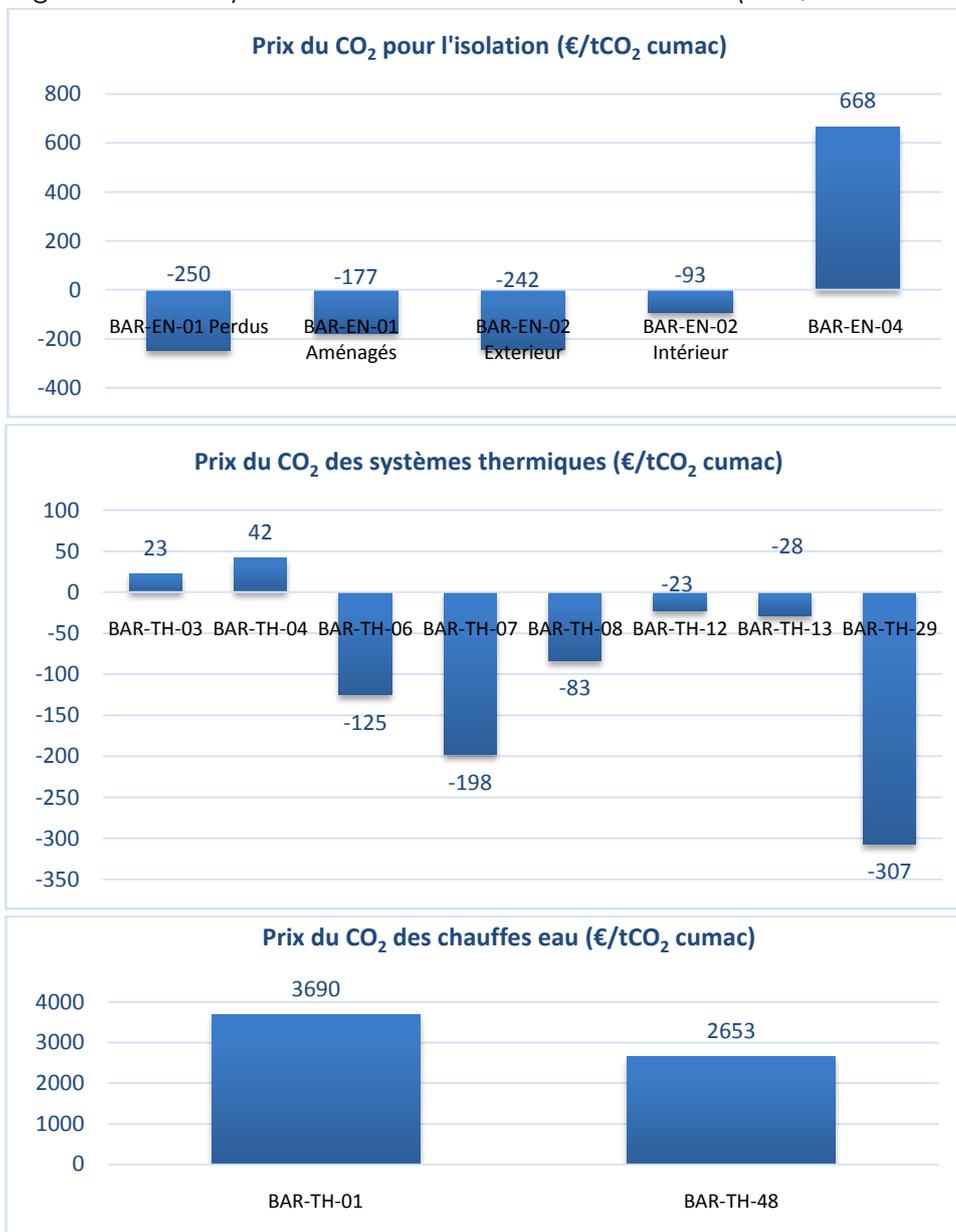


Source : (Xu X et al, 2014)

Les économies d'énergie réalisées au niveau national en 2012 sont estimées en se basant sur des hypothèses détaillées dans les sections suivantes.

En appliquant la formule (1) avec les coûts moyens d'investissement et l'économie d'énergie conforme à la valorisation des fiches CEE, on obtient les coûts du CO<sub>2</sub> évité suivants pour chacune des opérations retenues :

Figure 3 : Prix moyen du CO<sub>2</sub> des actions de rénovation (en €/tCO<sub>2</sub> cumac)



Les graphiques montrent que l'ensemble des actions ont un coût du CO<sub>2</sub> négatif, excepté les fenêtres doubles vitrages, les PAC sur un réseau d'eau et les chauffe-eau solaire ou thermodynamique. En d'autres termes, sous les hypothèses retenues et en valeurs moyennes, pour une grande part des Opérations Standardisées (OS) des CEE, les économies d'énergie suffisent à rentabiliser l'investissement sans qu'il soit besoin de rémunérer l'économie d'émission de GES. En revanche, quelques opérations (notamment les chauffe-eau solaires et thermodynamiques) nécessiteraient un prix du CO<sub>2</sub> exorbitant pour présenter un coût nul ce qui s'explique par le fait que l'investissement dans ces opérations coûtent cher et que le coût

de la consommation d'eau chaude dans un logement reste modéré notamment en regard de celui du chauffage.

Par ailleurs, « l'ordre de mérite » des travaux joue un faible rôle dans les décisions réelles d'investissement dans la rénovation énergétique. Les actions les moins rentables en CO<sub>2</sub>, comme, par exemple, l'installation des « fenêtres doubles vitrages » représentent les principales actions d'isolation entreprises par les ménages français en 2012 (Ademe, 2013). Cette action mérite une réflexion particulière : l'opération est en général loin d'être « rentable » si l'on considère le seul bénéfice thermique, mais il faudrait y ajouter les bénéfices acoustique et patrimonial, souvent primordiaux pour les ménages, mais évidemment difficile à chiffrer. En outre, ce résultat paraît somme toute assez normal du point de vue des décisions des ménages qui semblent se baser sur le signal du prix des travaux pour juger la qualité des actions (Stolyarova, H et al, 2015).

### 3. Aperçu sur les courbes des coûts d'abattement

Dans l'économie du changement climatique, le coût d'abattement (en €/tCO<sub>2</sub>éq) d'une tonne de CO<sub>2</sub> grâce à une action donnée est défini comme le coût de l'action de réduction rapporté à la quantité d'émission de CO<sub>2</sub> « abattue » (diminuée ou évitée selon les cas) grâce à cette action. Le coût marginal est le coût d'abattement de la dernière tonne nécessaire pour atteindre un objectif donné. Les courbes monotones des coûts marginaux d'abattement regroupent l'ensemble des coûts marginaux d'abattement de différentes actions sur un même schéma, par ordre croissant du coût et en cumulant les réductions.

Le concept de courbes de réduction des émissions de carbone a été appliqué depuis le début des années 1990 pour illustrer le coût associé à la réduction des émissions de carbone (Jackson, 1991). Au fil du temps, le concept est devenu très utilisé. Néanmoins, les décideurs politiques se voient confrontés à plusieurs formes de MACC (« *Marginal Abatement Cost Curves* ») variant selon la zone géographique, l'horizon de temps, les secteurs inclus et l'approche utilisée pour leur construction (Kesicki, 2013, 2010 ; McKinsey & Company, 2009 ; Schrotten et al., 2012; Bockel et al, 2012; MacLeod et al, 2011).

Il existe deux types de MACC, « *expert-based* » et « *model-derived* ». Les MACC *expert-based*, parfois aussi appelés courbes de coût de la technologie, classent les mesures technologiques du moins cher au plus cher pour un objectif de réduction des émissions ciblé et un coût supporté par les particuliers lorsqu'ils prennent des décisions d'investissement. Leur principal avantage est qu'elles sont faciles à interpréter par les pouvoirs publics : si un niveau de réduction des émissions est particulièrement ciblé, on sait quel type de mesures doit être mis en œuvre pour atteindre cet objectif (dans une hypothèse de fluidité parfaite de l'économie). Néanmoins, ce modèle ne prend pas en compte l'aspect comportemental des consommateurs notamment l'« effet rebond<sup>8</sup> ». Il exclut également la réduction des émissions engendrée par les futures technologies, et il simplifie la réalité dans la mesure où il attribue un objectif de réduction à une seule technologie sans tenir compte des différents types d'interactions qui peuvent être entrepris par les ménages. Ces courbes qui résument les coûts de dépollution et les potentiels de réduction associés pour des dates lointaines dans l'avenir sont sujettes à des incertitudes importantes concernant les coûts de la technologie, les prix de l'énergie, l'actualisation ou le développement de la demande (Kesicki, 2010).

Les MACC *model-derived*, qui sont scindés en deux groupes, *Bottom-Up (BU)* et *Top-Down (TD)*, sont des modèles de simulation ou d'optimisation qui calculent un équilibre partiel, soit par la réduction des coûts du système ou en maximisant le surplus du consommateur et du

---

<sup>8</sup> L'augmentation du confort suite à la réalisation des travaux de rénovation énergétique.

producteur. Les modèles BU<sup>9</sup> s'intéressent uniquement au secteur de l'énergie (van Vuuren et al, 2004) contrairement au modèle TD qui couvre l'économie entière<sup>10</sup> d'un pays (Ellerman et al, 1998). En effet, la notion de coût est différente pour ces deux types de modèles : les modèles BU incluent les coûts sectoriels (coût de la technologie, coûts de l'énergie, coûts indirects du marché...) tandis que pour les modèles TD, ceux sont les coûts macroéconomiques qui sont pris en compte. Les modèles TD sont généralement accusés de surestimer les coûts marginaux de réduction. Ceci est expliqué par le fait que les modèles TD comptent sur les élasticités de substitution entre les facteurs de production, qui sont estimés sur des données historiques et donc projettent un potentiel de transformation limitée de l'économie dans l'avenir. Inversement, les modèles BU ont été accusés de sous-estimer les coûts marginaux de réduction en raison de l'ignorance de certains effets micro et macroéconomiques (Hourcade et al, 2006). Les deux modèles mettent l'accent sur les émissions absolues, sans tenir compte de l'aspect technologique.

Dans un contexte de politique publique, l'utilisation de ces courbes permet non seulement de mettre en œuvre des mesures incitatives basées sur la mise en place d'une taxe CO<sub>2</sub> ou de quotas d'émissions de carbone, mais elle peut aussi orienter la réglementation à venir dans le domaine de l'efficacité énergétique (subvention des technologies émergentes, dépenses en Recherche et Développement, fixation d'un plafond d'émission pour les bâtiments ...). En France, bien que le bâtiment résidentiel soit aujourd'hui reconnu comme un secteur majeur de la lutte contre le changement climatique, les potentiels de réduction des émissions et le coût des actions pour atteindre les objectifs sont assez mal connus.

La section suivante propose une méthode pour produire, à partir des données issues des opérations CEE et sous certaines hypothèses expliquées ci-dessous, des MACC « *expert-based* » qui peuvent conduire à des estimations plus proches de la réalité et mieux exploitables.

Dans la suite du document, des courbes de coût marginal d'abattement des émissions de CO<sub>2</sub> portant sur l'ensemble des travaux envisageables à long terme (2050 par exemple) seront construites. Il faut donc déterminer, pour chaque opération standardisée, le volume de travaux envisageable à long terme, dans l'hypothèse où tout ce qui est techniquement avantageux et possible se réaliserait à l'horizon considéré. Il est clair qu'au cours du temps ces courbes ont vocation à se transformer au fil des innovations techniques aujourd'hui imprévisibles, qui feront apparaître de nouvelles technologies, de nouvelles possibilités ou impossibilités, ou déformeront les échelles de prix de revient. Elles ont cependant pour but de donner la meilleure information disponible à la date d'aujourd'hui, susceptible d'éclairer les politiques publiques.

La principale hypothèse adoptée porte sur la distribution des coûts unitaires d'abattement constatée pour chaque opération en 2012 qui sera applicable à l'ensemble des travaux émergeant à cette opération effectués entre 2012 et 2050. Il s'agit d'une hypothèse forte, mais qui paraît justifiée au vu de la très grande dispersion des coûts unitaires constatés la même année (de 1 à 3 entre déciles extrêmes pour les moins dispersées, de 1 à 8 pour d'autres) et du fait que la même distribution a été observée dans le passé.

---

<sup>9</sup> (eg : TIMER : *Targets Image Energy Regional*).

<sup>10</sup> (eg : EPPA : *Emission Prediction and Policy Analysis*).

#### 4. Modélisation du potentiel du CO<sub>2</sub> en 2050 tenant compte des moyennes d'économie d'énergie estimées par le dispositif CEE

Le secteur résidentiel compte 33,4 millions de logements en 2012. Les maisons individuelles constituent 56 % de ce parc. Il est aussi réparti entre 55 % logements construits avant 1975 et 45 % construits après 1975. Selon l'INSEE, les Maisons Individuelles (MI) construites avant 1948 représentent 40 % du parc, celles construites entre 1948 et 1974 représentent 24 % et les MI construites après 1974 représentent 36 %. Pour les Logements Collectifs (LC), 70 % ont été construits avant 1975 (Maugard A, 2012).

Après avoir présenté les hypothèses prises en compte pour l'isolation et les systèmes thermiques, le potentiel en CO<sub>2</sub> des actions de rénovation sera modélisé sur la base de la moyenne des économies d'énergie du dispositif CEE. Pour l'isolation, l'intérêt est focalisé sur les logements construits avant 1975, (avant la première réglementation thermique), segment sur lequel les données sont disponibles et détaillées. Les logements construits après 1975 disposent déjà d'un niveau d'isolation tel qu'exigé par les différentes réglementations thermiques successives et dont le potentiel d'économie d'énergie est moindre. La répartition des travaux ainsi que leur niveau de performance réalisés au niveau national sont issus de l'enquête Phébus (Enquête Performance de l'Habitat, Équipements, Besoins et Usages de l'énergie) (2013).

##### 4.1 Hypothèses

Pour l'isolation, les mètres carrés à isoler à l'horizon 2050 pour les logements construits avant 1975 et en absence de données plus précises sur la répartition des niveaux de performance, sont estimés en supposant que :

- Les logements qui ne sont pas isolés aujourd'hui seront isolés en 2050,
- Les logements déjà isolés et dont la performance est conforme à la réglementation thermique dans l'existant (>RTex) vont rester isolés à l'horizon 2050 sans travaux d'investissement supplémentaires (la durée de vie des parois est conventionnellement de 35 ans).
- Pour les logements qui ont réalisé des travaux sans atteindre le niveau de la RT (<RTex), leurs gains énergétiques dépendent du niveau de performance de l'isolation (la résistance thermique).

Afin de simuler le gisement lié au parc entier des systèmes thermiques à l'horizon 2050, un certain nombre d'hypothèses sur le remplacement des systèmes thermiques existants dans le parc actuel a été pris en compte (table 3) et qui vont conditionner les résultats. Les données du parc 2012 sont issues du « Recensement rénové de la population en 2006, résultats 2011 et évolution en métropole » (CEREN, 2015).

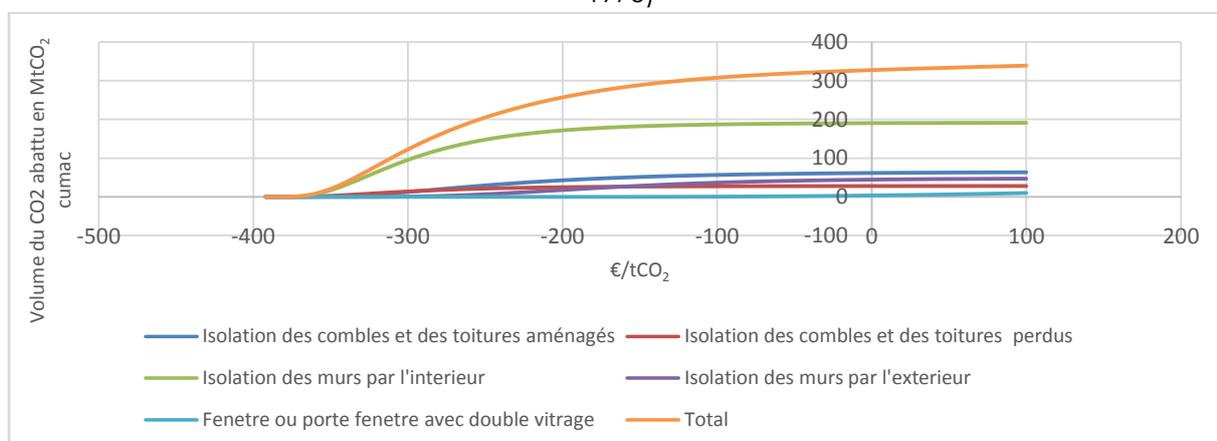
Table 3 : Hypothèses de remplacement du parc des systèmes thermiques à l'horizon 2050

Parc Existant (2012)	Parc 2012	Hypothèse de remplacement à l'horizon 2050		
Chauffage Electrique	7568132	PAC air/air		
			70%	
		APP indépendants chauffage au bois		
			30%	
Chauffage Fuel (CF)	Zone Non Desservie en GAZ (MI)	1691379	Chaudière biomasse individuelle (ZNG-CF)	40%
			PAC air/ eau individuelle (ZNG-CF)	60%
	Zone Desservie en GAZ (MI)	1907837	Chaudière Gaz individuelle (ZDG-CF)	60%
			Chaudière biomasse Individuelle (ZDG-CF)	20%
			PAC air/eau individuelle (ZDG-CF)	20%
Chauffage Fuel collectif	Zone Non Desservie en GAZ (LC)	844217	Chaudière Gaz collective (ZDG-CF)	100%
	Zone Desservie en GAZ (LC)	121193	PAC air/ air <sup>11</sup>	100%
Chauffage Gaz (immeuble collectif)	4730117	Chaudière condensation collective		100%
Chauffage Gaz (Maisons Individuelles)	4288161	Chaudière condensation individuelle		100%

## 4.2 Résultats

Pour l'isolation des MI construits avant 1975, la figure 4 montre que le potentiel de réduction totale des émissions de CO<sub>2</sub> en 2050, à **un coût du CO<sub>2</sub> nul** (0€/tonne de CO<sub>2</sub>), est d'environ 327 Mtonne de CO<sub>2</sub> cumulés sur la durée de vie (35 ans) et actualisés à un taux de 4%. Ceci correspond à 16,84 Mtonne de CO<sub>2</sub> d'émissions évitées annuellement. Cet objectif peut être atteint par 190 Mt de CO<sub>2</sub> cumac (9,78 Mt/an) pour l'isolation des murs par l'intérieur, 61 Mt de CO<sub>2</sub> cumac ((3,14 Mt /an) pour l'isolation des combles aménagés, 44 Mt de CO<sub>2</sub> cumac (2,66 Mt/an) pour l'isolation des murs par l'extérieur et 27 Mt de CO<sub>2</sub> cumac (1,39 Mt/an) pour l'isolation des combles perdus et 5 Mt de CO<sub>2</sub> cumac (0,25 Mt/an) pour les fenêtres doubles vitrages.

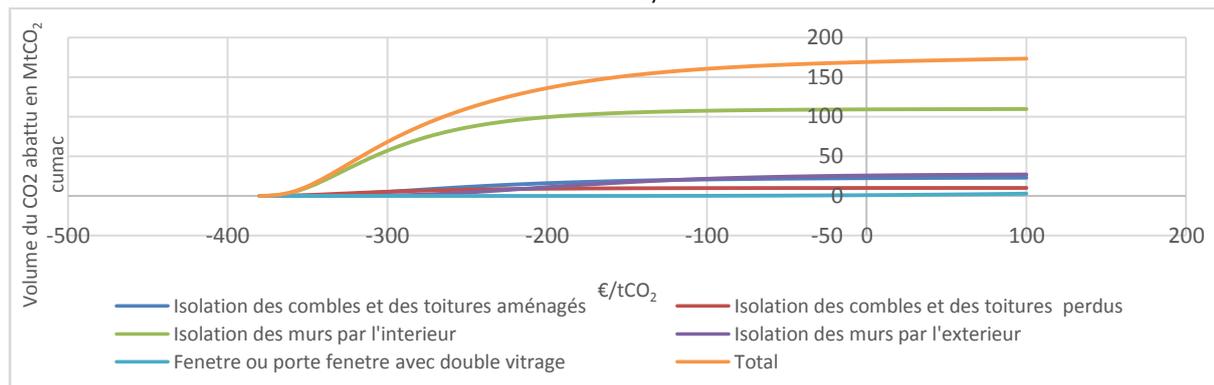
Figure 4 : Le gisement en CO<sub>2</sub> évité de l'enveloppe du dispositif CEE à l'horizon 2050 (MI <1975)



<sup>11</sup> En raison de manque de données sur les prix des chaufferies biomasses collectives, l'hypothèse que le chauffage fioul sera remplacé à 100% par une PAC air/air à l'horizon 2050 a été admise.

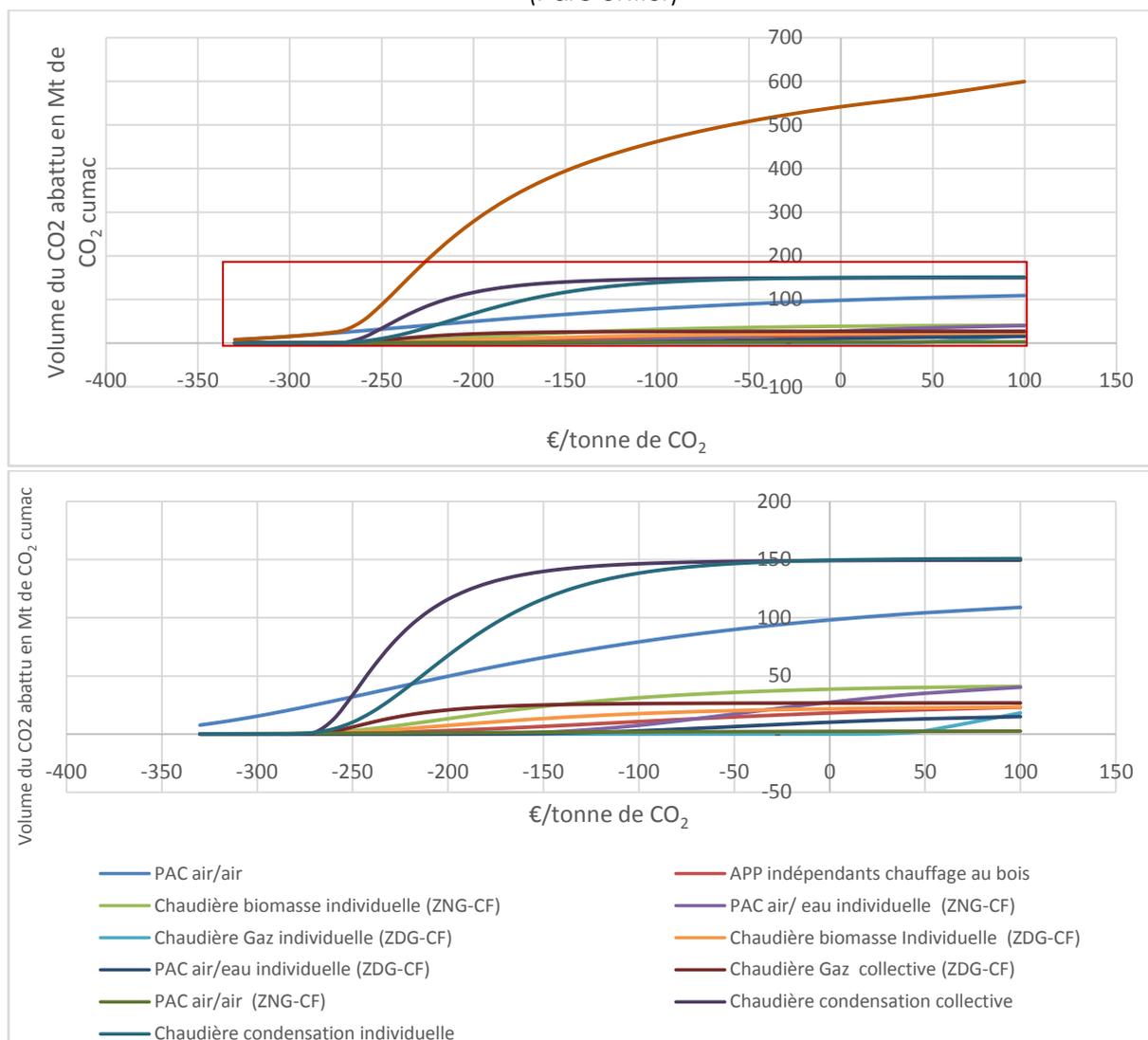
Pour les logements collectifs construits avant 1975 (figure 5), la somme des objectifs d'émissions de CO<sub>2</sub> évitées à l'horizon 2050 et à **un coût du CO<sub>2</sub> nul** est de 168 Mtonne de CO<sub>2</sub> cumac (environ 8,65 Mtonne/an), répartie entre 109 Mt de CO<sub>2</sub> cumac (5,61 Mt/an) pour l'isolation des murs par l'intérieur, 22 Mt de CO<sub>2</sub> cumac (1,13 Mt/an) pour l'isolation des combles aménagés, 25 Mt de CO<sub>2</sub> cumac (1,28 Mt/an) pour isolation des murs par l'extérieur et 10 Mt de CO<sub>2</sub> cumac (0,51Mt/an) pour l'isolation des combles perdus et 1 Mt de CO<sub>2</sub> cumac (0,05 Mt/an) pour les fenêtres doubles vitrages.

Figure 5 : Le gisement en CO<sub>2</sub> évité de l'enveloppe du dispositif CEE à l'horizon 2050 (LC <1975)



La figure 6 montre que pour les systèmes thermiques, à **un coût du CO<sub>2</sub> nul**, le total de réduction des émissions par les appareils thermiques (542 Mt de CO<sub>2</sub> cumac [47 Mt/an]) est réparti entre 149 Mt de CO<sub>2</sub> cumac (12,2 Mt/an) pour les chaudières condensation, 98 Mt CO<sub>2</sub> pour la PAC air/ air (8 Mt/an), et 18 Mt de CO<sub>2</sub> cumac (1,5 Mt/an) pour les appareils indépendants du chauffage en bois. Concernant les équipements remplaçant un chauffage au fioul dans une zone non desservies en gaz, à un coût nul du CO<sub>2</sub>, le potentiel de réduction est de 49 Mt de CO<sub>2</sub> cumac (4 Mt/an) pour la chaudière biomasse individuelle, 27 Mt de CO<sub>2</sub> cumac (2,2 Mt/an) pour la PAC air/eau, et 2 Mt de CO<sub>2</sub> cumac pour la PAC air/air (0,16 Mt/an). Dans les zones desservies en gaz, le potentiel de réduction de la chaudière biomasse à un coût nul est de 22 Mt de CO<sub>2</sub> cumac (1,8 Mt/an), 27 Mt de CO<sub>2</sub> pour la chaudière gaz collective (2,2 Mt/an) et celui de la PAC air/ eau est de 10 Mt de CO<sub>2</sub> cumac (0,8 Mt/an).

Figure 6 : Le gisement du CO<sub>2</sub> évité des systèmes en parc du dispositif CEE à l'horizon 2050 (Parc entier)



## 5. Modélisation du gisement en CO<sub>2</sub> prenant en compte l'hétérogénéité des économies d'énergie réalisées

Cette section présente la modélisation du prix du CO<sub>2</sub> en intégrant l'hypothèse que les valorisations des économies d'énergie estimées par le dispositif CEE sont une moyenne des économies réelles. Les valorisations des fiches sont produites au sein de commissions d'experts, à partir de calculs techniques. Il serait intéressant de rapprocher, sur un échantillon significatif, ces valorisations des économies réellement constatées *in situ* après réalisation des opérations. A notre connaissance, aucune étude publique ne donne actuellement cette information. Faute de telles informations, l'hypothèse que les économies estimées par le dispositif CEE sont réellement réalisées (en moyenne) par les ménages français est retenue. Cette dernière hypothèse est forte car la méthode de calcul des fiches standardisées à priori est basée sur des hypothèses retenues dans le DPE (Diagnostic de Performance Energétique) et la Réglementation Thermique. Plusieurs études, dont celle de (Allibe., B, 2012 ; OSSO., D, et al 2011 ; Laurent., et al 2011) ont montré que les modèles de calcul thermique de référence utilisés pour la modélisation de la consommation énergétique se basent sur un

comportement des ménages dit « normé » qui peut s'éloigner du comportement réel. Les données conventionnelles prises en considération se basent sur des données théoriques : par exemple le DPE estime que la température intérieure constante est fixée à 18-19°C dans toutes les pièces avec une réduction de nuit pendant 8h et une semaine d'inoccupation en période d'hiver. En réalité, les ménages adoptent généralement des comportements qui s'éloignent de ce qui a été prévu par la réglementation (CGDD, 2011), notamment « l'effet rebond » : les ménages ayant réalisé des améliorations thermiques en profitent pour améliorer leur confort, réduisant ainsi l'économie d'énergie constatée. Une autre étude réalisée par le CNRS sur les données de deux Enquêtes Logement (EL) de l'INSEE montre qu'un degré Celsius supplémentaire du chauffage fait augmenter les émissions de gaz carbonique des maisons individuelles de 4,2 % (chauffage électrique) à 9 % (chauffage au gaz) (Cavaillès, J. et al., 2011).

Les estimations de la consommation d'énergie d'un logement par le DPE fournissent des résultats très approximatifs, voire biaisés car les comportements réels du ménage peuvent être très éloignés de la norme utilisée dans la modélisation. Les facteurs expliquant l'écart entre consommation à *priori* et à *posteriori* doivent être introduits dans les modèles de calculs afin d'apporter plus de réalisme, notamment l'usage technologique et le choix d'investissement en rénovation. Selon (Allibe.,B. 2012), les modèles les plus réalistes sont généralement les moins optimistes en termes de réduction des consommations énergétiques et des émissions de GES.

## 5.1 Hypothèses

Afin de déterminer les paramètres de la distribution des économies d'énergie réalisées au niveau national, l'étude se base sur les observations des économies réalisées lors d'enquêtes d'EDF réalisée auprès des ménages ayant participé à des opérations de Maîtrise de la Demande en Energie (MDE), promouvant la réalisation d'actions de rénovation énergétique de leur logement dans différentes régions (PACA, Meuse et Haute-marne) ainsi qu'un échantillon de 106 maisons individuelles en Bretagne réalisant l'action de rénovation « installation d'un poêle au bois »

Les résultats des observations *ex post* indiquent globalement qu'environ 85 % des ménages diminuent leur consommation après travaux quels que soient les régions concernées et le type de travaux réalisés.

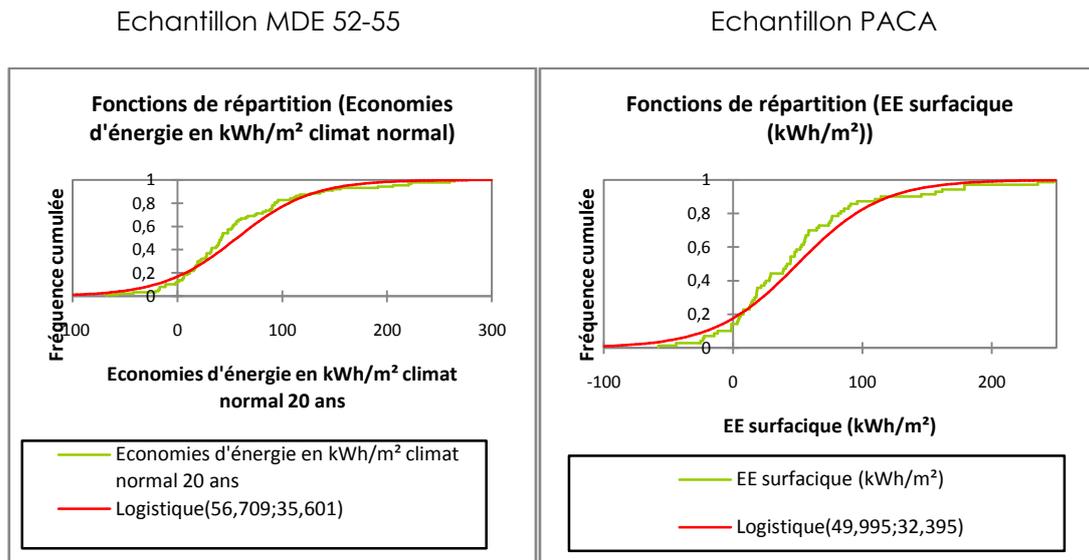
Les échantillons ne sont pas représentatifs en termes de nature d'opérations réalisées à l'échelle nationale. L'analyse des économies par type d'action réalisée dans les deux échantillons a montré de nettes divergences par rapport aux actions réalisées par les ménages français en 2010 (83 % de l'échantillon MDE 52/55 affirment réaliser des actions d'isolation de toiture alors qu'au niveau national, cette action ne représente que 18 % des travaux réalisés). Cela n'invalide toutefois pas l'hypothèse de transposabilité qu'on peut faire sur la dispersion des économies constatées et sur leur distribution statistique. Quant aux systèmes de chauffage, l'action majoritaire réalisée par les ménages des deux échantillons est l'installation d'une PAC (air/ air ou air/eau) alors qu'au niveau national, ce type de travaux ne représente que 1 %.

Au niveau national, les caractéristiques majoritaires des logements ayant effectué des travaux MDE en 2010 concordent à un certain degré avec les caractéristiques de l'échantillon MDE 52-55 (Raynaud, 2012). La seule différence porte sur la surface et l'énergie principale du chauffage avant travaux. La même comparaison effectuée avec l'échantillon MDE PACA a souligné la spécificité de ce dernier. Les économies réalisées des trois échantillons ne sont pas représentatifs des économies réalisées au niveau national, mais les distributions observées présentent des points communs (figure 7) :

- **Distribution des gains énergétiques assimilables à une distribution logistique.**
- **Proportion des « gains se révélant négatifs » de l'ordre de 20%.**

En outre, la même distribution a été observée sur l'échantillon concernant la Bretagne. Ces constats faits sur des opérations de nature très différentes paraissent assez stables pour les appliquer à l'ensemble des opérations traitées dans cette étude.

Figure 7 : les fonctions de répartitions des économies d'énergie (Raynaud, M, 2014)



## 5.2 Méthodologie

A partir de ces différentes observations et en absence de données sur les économies réelles réalisées pour chaque opération éligible aux CEE au niveau national, trois postulats sont posés :

- **Pour chaque OS, la moyenne des économies estimées par les fiches standardisées des certificats d'économie d'énergie est la moyenne des économies d'énergie réalisées au niveau national.** Pour les raisons évoquées précédemment, il s'agit potentiellement d'une hypothèse optimiste.
- **Les économies au niveau national pour une même opération suivent le même type de distribution (logistique).** En effet, la distribution des économies d'énergie dans chacun des trois échantillons suit une loi logistique, Il y a toute raison de penser qu'on peut modéliser la distribution des économies réalisées dans les autres opérations par le même type de fonction.
- Chacune des fonctions de répartition des trois échantillons fait ressortir une proportion d'environ 20 % des ménages qui réalisent des « économies négatives ». L'hypothèse que cette proportion était généralisable aux autres types d'opération a été admise et donc qu'**en moyenne 20 % des ménages réalisent des économies négatives**. Cela s'explique soit par l'effet rebond lié notamment à une forte restriction énergétique initiale, les malfaçons ou encore par l'incertitude due au caractère déclaratif des enquêtes.

Les paramètres de la loi logistique de la distribution des économies d'énergie au niveau national ont été estimés en se basant sur cette dernière hypothèse.

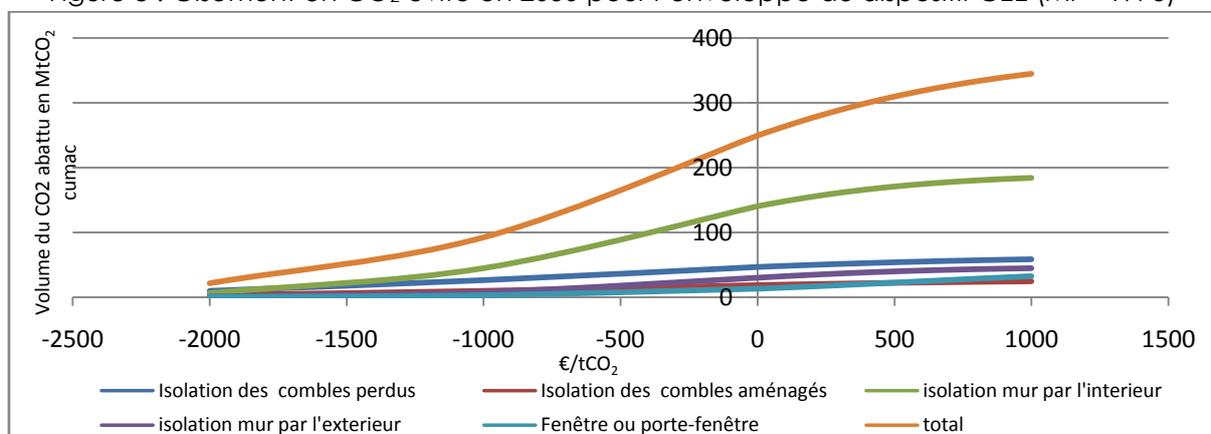
### 5.3 Résultats

La méthode utilisée est basée sur un tirage aléatoire du fait que les deux distributions « Investissement » et « Economie d'énergie » sont indépendantes avec des lois de probabilités différentes (l'investissement suit une loi log normale, et les économies d'énergies suivent une loi logistique). Pour chaque action de rénovation, le prix du CO<sub>2</sub> est simulé en se basant sur la formule (1) et les hypothèses répertoriées ci-dessus. Les résultats se sont présentés sous forme d'une distribution logistique pour toutes les actions.

Pour calculer le gisement en CO<sub>2</sub> lié à l'enveloppe à l'horizon 2050 (logements construits avant 1975), les mêmes données que celles utilisées dans la partie « gisement en parc à l'horizon 2050 » ont été pris en compte (issues de l'enquête Phébus).

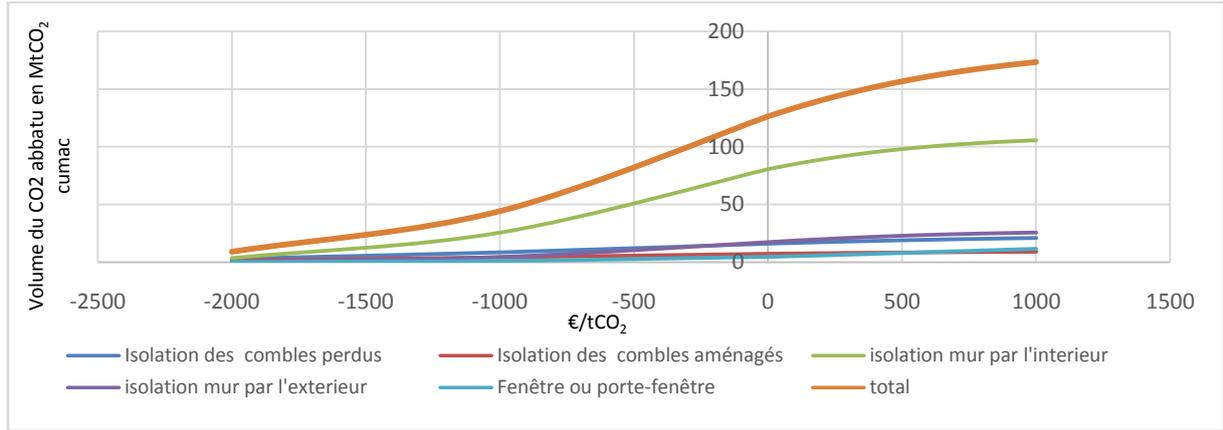
Les graphiques 8 et 9 montrent que l'objectif total de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> pour l'isolation des logements construits avant 1975, à **un coût du CO<sub>2</sub> nul**, est de 375 Mt de CO<sub>2</sub> cumac (19,31 Mt/an). Ce résultat semble moins optimiste que le résultat obtenu dans le gisement en parc des parois en 2050 (495 Mt de CO<sub>2</sub> cumac [25,5 MtCO<sub>2</sub>/an]), ce qui revient à considérer que l'introduction de l'hétérogénéité dans le comportement des ménages sur la base des économies observées en régions a apporté du réalisme à notre modèle et par conséquent a réduit la rentabilité des actions.

Figure 8 : Gisement en CO<sub>2</sub> évité en 2050 pour l'enveloppe du dispositif CEE (MI < 1975)



Pour les MI construits avant 1975 (figure 8), à **un coût nul**, les 249 Mt de CO<sub>2</sub> cumac (12,82 Mt/an) de l'ensemble des actions réalisées sont répartis entre 140,28 Mt de CO<sub>2</sub> cumac (7,22 Mt/an) pour l'isolation des murs par l'intérieur, 46,86 Mt de CO<sub>2</sub> cumac (2,41 Mt/an) pour l'isolation des combles perdus, 30,23 Mt de CO<sub>2</sub> cumac (1,55 Mt/an) pour l'isolation des murs par l'extérieur, 18,75 Mt de CO<sub>2</sub> cumac (0,96 Mt/an) pour l'isolation des combles aménagés et 13 Mt de CO<sub>2</sub> cumac (0,66 Mt/an) pour les fenêtres doubles vitrages.

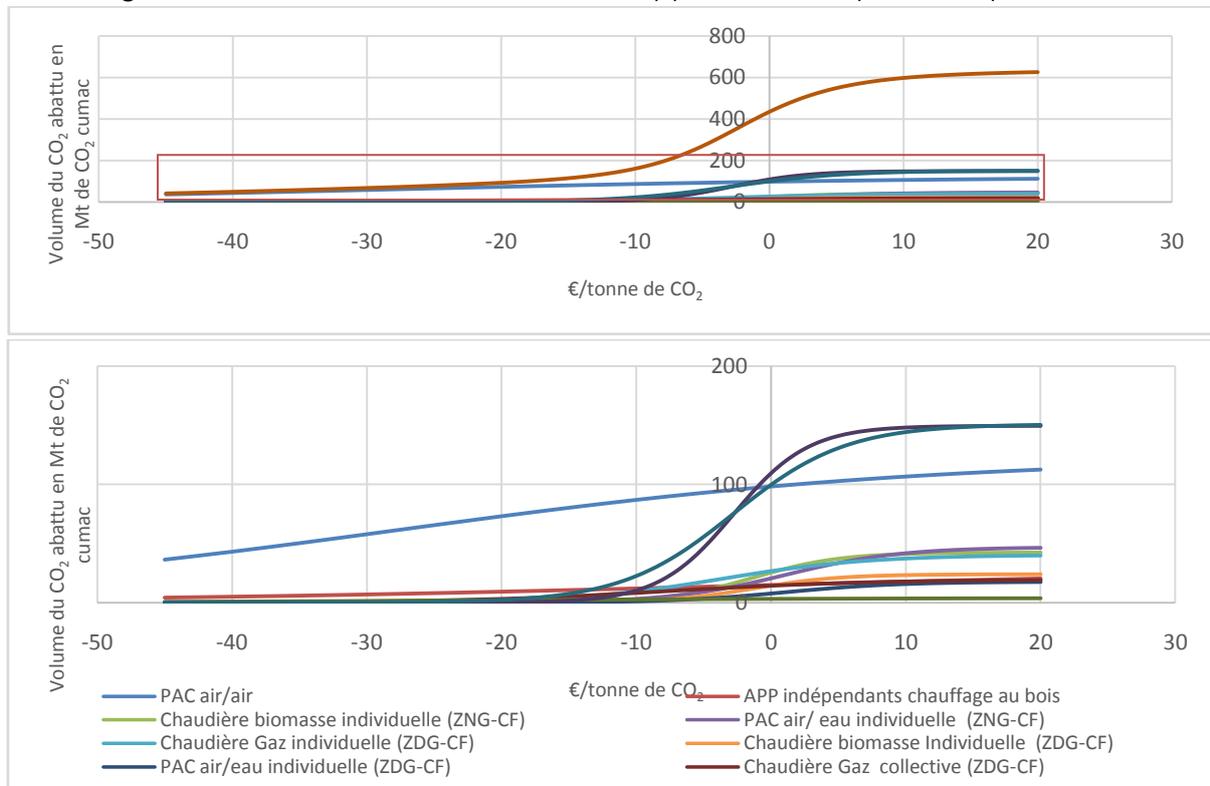
Figure 9 : Gisement en CO<sub>2</sub> en 2050 de l'enveloppe du dispositif CEE (LC avant 1975)



Pour les LC construits avant 1975, l'objectif de 126,28 Mt de CO<sub>2</sub> cumac (6,5 Mt/an) est réparti entre 80,68 Mt de CO<sub>2</sub> cumac (4,15 Mt/an) pour l'isolation des murs par l'intérieur, 17,5 Mt de CO<sub>2</sub> cumac (0,9 Mt/an) pour l'isolation des murs par l'extérieur, 16,04 Mt de CO<sub>2</sub> cumac (0,82 Mt/an) pour l'isolation des combles perdus, 7,37 Mt de CO<sub>2</sub> cumac (0,37 Mt/an) pour l'isolation des combles aménagés et 4,67 Mt de CO<sub>2</sub> cumac (0,49 Mt/an) pour les fenêtres doubles vitrages.

Concernant les appareils thermiques, les hypothèses prises sont les mêmes que dans la partie du gisement en parc, le résultat est présenté dans la figure 10 :

Figure 10 : Gisement en CO<sub>2</sub> en 2050 des appareils thermiques du dispositif CEE



Le résultat montre que le potentiel global de réduction des appareils thermiques est, à un **coût du CO<sub>2</sub> nul**, d'environ 434 Mt de CO<sub>2</sub> cumac (35,8 Mt/an). Il est inférieur à celui calculé dans le gisement en parc (542 Mt de CO<sub>2</sub> cumac [44,7 Mt/an]). Les trois-quarts de cet objectif

(environ 306 Mt de CO<sub>2</sub> cumac [25,2 Mt/an]) sont réalisés par les deux chaudières à condensation (individuelle 99Mt CO<sub>2</sub> cumac et collective 109 Mt CO<sub>2</sub> cumac) et la PAC air/air (98 MT de CO<sub>2</sub> cumac).

Pour les systèmes remplaçant un chauffage au fioul dans une zone non desservie au gaz, le potentiel de réduction par action, à un coût nul du CO<sub>2</sub>, est de 25 Mt de CO<sub>2</sub> cumac (2,06 Mt/an) pour les chaudières biomasse individuelle, 20 Mt de CO<sub>2</sub> cumac (1,65 Mt/an) pour la PAC air/eau et 3 Mt de CO<sub>2</sub> cumac (0,24 Mt/an) pour la PAC air/air.

Pour les systèmes remplaçant un chauffage au fioul dans une zone desservie en gaz, le potentiel de réduction des émissions à un coût nul est réparti entre la chaudière gaz individuelle avec 26 Mt de CO<sub>2</sub> cumac (2,14 Mt/an), 14 Mt de CO<sub>2</sub> cumac (1,15 Mt/an) pour la chaudière individuelle biomasse et la chaudière gaz collective et 7 Mt de CO<sub>2</sub> cumac (0,57 Mt/an) pour la PAC air/eau. Enfin, 15 Mt de CO<sub>2</sub> cumac (1,23 Mt/an) pour les appareils indépendants du chauffage au bois remplaçant un chauffage électrique.

## 6. Discussion

Les résultats obtenus dans notre étude semblent indiquer, sous réserve de validation des hypothèses prises en compte, un ordre de rentabilité des actions de rénovation énergétique dans le bâtiment résidentiel. Cette vision globale cache parfois des réalités différentes.

D'un côté, en se basant sur les valorisations des économies d'énergie issues du dispositif CEE, le potentiel global de réduction des émissions est de 495 Mt de CO<sub>2</sub> cumac (25,5 Mt/an) pour l'isolation et de 542 Mt de CO<sub>2</sub> cumac (44,7 Mt/an) pour les systèmes thermiques. Rappelons que le périmètre n'est pas le même (total du parc de bâtiments existant pour les appareils thermiques, logement construits avant 1975 pour l'isolation). En supposant que le comportement des ménages réalisant des travaux de rénovation au niveau national est identique au comportement observé des ménages lors d'enquêtes particulières (80 % des ménages réalisant des travaux ont des économies positives), le volume de carbone évité à coût nul s'est réduit et est passé à 375 Mt de CO<sub>2</sub> cumac (19,31 Mt/an) pour l'isolation et 434 Mt de CO<sub>2</sub> (35,8 Mt/an) pour les systèmes thermiques. Ceci implique que l'introduction de l'hétérogénéité du comportement des ménages dans le modèle a permis de se rapprocher plus de la réalité.

D'un autre côté, les résultats trouvés n'autorisent pas l'addition des potentiels en CO<sub>2</sub> des différentes actions (Isolation et systèmes thermique). L'objet principal de cet exercice était de simuler le prix du CO<sub>2</sub> par action et mesurer le potentiel de CO<sub>2</sub> évité pour chaque action de rénovation indépendamment (sans prendre en compte le fait qu'un ménage peut réaliser plusieurs actions de rénovation en même temps (ex : changement de système de chauffage et isolation)) afin d'apporter une meilleure visibilité sur les actions de rénovation énergétiques à entreprendre dans les années à venir.

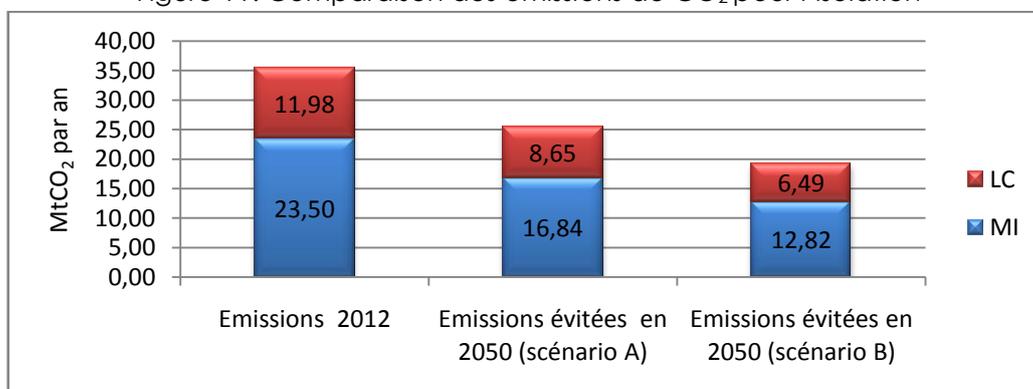
Par ailleurs, en comparant les résultats obtenus avec ceux fournis par le rapport de l'ADEME (2011) sur les coûts d'abattement des actions de rénovation, le même ordre de mérite est retrouvé (table 4). Néanmoins, il n'est pas possible de procéder à une analyse comparative pointue du fait que l'étude ne fournit pas des détails sur les données d'investissement et les hypothèses introduites.

Table 4 : Comparaison des prix du CO<sub>2</sub> des actions de rénovation énergétique

Unité : €/tonne de CO <sub>2</sub>	Etude ADEME (2011)	résultats obtenus (2012)
Isolation murs par l'intérieur	-166	-242
Isolation murs par l'extérieur		-93
Isolation des combles perdus		-250
Isolation des combles aménagés		-177
Appareils indépendants de chauffage au bois	-4	-22,7
Fenêtres doubles vitrages (par m <sup>2</sup> )	26,4	171
PAC air/ eau	185	42
PAC eau/eau		23
Chauffe-eau solaire	916	3690

En outre, en comparant les émissions actuelles des logements construits avant 1975<sup>12</sup> (CEREN, 2014) pour l'isolation, le gisement d'isolation simulé à partir des économies d'énergie basées sur les valorisations du dispositif CEE (scénario A) permettra de réduire les émissions actuelles (2012) de 35 Mt/an à 25,5 Mt/an de CO<sub>2</sub> en 2050 et celui basé sur le comportement des ménages réalisant des travaux<sup>13</sup> (prise en compte de l'effet rebond, malfaçons ou autre facteur engendrant une surconsommation énergétique : scénario B) permettra d'atteindre un niveau d'émission évitées de 19,3 Mt de CO<sub>2</sub> en 2050. La simulation des trajectoires globales de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> jusqu'à 2050 montre qu'il est possible d'atteindre approximativement **un facteur 2 pour l'enveloppe** (isolation murs, combles et fenêtres sans isoler les planchers bas) (figure 11).

Figure 11 : Comparaison des émissions de CO<sub>2</sub> pour l'isolation



## Conclusion générale

La France s'est engagée à diviser par quatre les émissions des GES en 2050 par rapport à 1990. Un certain nombre de politiques ont été mises en place afin d'atteindre cet objectif dont le dispositif Certificats d'Economies d'Énergie (CEE). Cette étude a mesuré le bilan de ce dispositif en termes de carbone évité après presque dix années de mise en place et a proposé un modèle permettant, sous un ensemble d'hypothèses précisées, de modéliser le

<sup>12</sup> Emissions calculées à partir des consommations énergétiques de ces logements en utilisant les mêmes facteurs d'émissions pris en compte dans notre étude.

<sup>13</sup> Sous réserve de validation des hypothèses prises.

gisement en CO<sub>2</sub> à l'horizon 2050 des principales actions de rénovation énergétique dans le bâtiment résidentiel.

Les MACC produites ont exprimé un ordre de mérite (des moins coûteuses aux plus coûteuses) des actions de rénovation, à commencer par l'isolation des murs, des combles, les PAC, la chaudière biomasse et les chaudières condensation qui, dans la plupart des cas, avaient un prix marginal du CO<sub>2</sub> négatif. Pour les chauffe-eau solaire ou thermodynamique, le prix du CO<sub>2</sub> était plus élevé du fait que le coût d'investissement est important comparé aux faibles besoins énergétiques. Il faut garder à l'esprit que ces actions ont été étudiées individuellement dans l'esprit du dispositif des CEE conduisant à des gisements associés qui ne sont pas cumulatifs. Ainsi, la rentabilité d'une action sur un système thermique sera réduite si elle intervient après une action sur le bâti.

Par ailleurs, nos résultats laissent clairement présager que le secteur du bâtiment résidentiel possède un potentiel en CO<sub>2</sub> important. La majorité des actions sont réalisées à un coût du CO<sub>2</sub> négatif. Néanmoins, l'étude présente toutefois des limites liées à la non prise en compte des coûts cachés pouvant constituer des barrières à l'investissement dans la rénovation énergétique. Ces coûts correspondent généralement au dérangement occasionné par l'installation des équipements intérieurs (particulièrement important dans le cas des travaux d'isolation).

Du point de vue des choix de politique publique actuelle, les subventions de 30 % du Crédit d'Impôt pour la Transition Énergétique englobent l'ensemble des actions de rénovation, le seul critère pris en compte est la performance exprimé en kWh d'énergie finale. La mise en place d'un tel mécanisme de soutien à l'ensemble de la filière du bâtiment non seulement, ne permet pas l'émergence des technologies les plus intéressantes en termes de CO<sub>2</sub> mais en outre, il traite sur une même échelle les actions rentables et les non rentables en termes de CO<sub>2</sub> comme les fenêtres doubles vitrages. Ces dernières possèdent en effet le plus important taux de réalisation des actions d'isolation entrepris par les ménages français au niveau national même si le bénéfice énergétique et les gains en CO<sub>2</sub> qu'elles engendrent sont faibles.

Par ailleurs, il ne faut pas oublier que la simple question du coût du CO<sub>2</sub> évité ne permet pas de tenir compte du volume absolu évité par type d'action.

En outre, la subvention de l'ensemble des technologies dans le bâtiment résidentiel peut également engendrer des effets pervers qui se traduisent par une hausse des prix des équipements. Comme suggéré par (Laurent, 2011), la mise en place d'une politique de subvention des actions de rénovation les moins chères, à un niveau de performance égal, peut lutter contre ces externalités négatives.

## Bibliographie

- Bockel L, (2012), Using Marginal Abatement Cost Curves to Realize the Economic Appraisal of Climate Smart Agriculture Policy Options, The EX Ante Carbon balance Tool, Pages 1-30.
- Cavaiilhès J, Joly D, Brossard T, Cardot H, Hilal M, Waverskey P, (2011), La consommation d'énergie des ménages en France, CNRS/INRA.
- Ellerman A, Decaux A, (1998), Analysis of Post Kyoto CO<sub>2</sub> Emissions Trading Using Marginal Abatement Curves, Cambridge, MA, Massachusetts Institute of Technology.
- Giraudet LG, Bodineau L, et Finon D, The costs and benefits of white certificates schemes, Energy efficiency, Volume 5, Pages 179-199.
- Hourcade J-C, Jaccard M, Bataille C and Gherzi F (2006), Hybrid Modeling: New Answers to Old Challenges Introduction to the Special Issue of The Energy Journal. Energy Journal. Volume 27. Pages: 1-11.
- Jackson T, (1991). Least cost greenhouse planning supply curves for global warming abatement. Energy Policy, Pages 35-46.
- Kesicki F, (2010), Marginal abatement cost curves for policy making expert-based vs. model-derived curves, IAEE's 2010 International Conference. Rio de Janeiro.
- Kesicki F, (2013), Marginal Abatement Cost Curves: Combining Energy System Modelling and Decomposition Analysis. Energy Institute.
- Laurent M, Tigchelaar C, Galvin R, Oreszczyn T, et Hamilton I, (2011), Back to reality: How domestic energy efficiency policies in four European countries can be improved by using empirical data instead of normative calculation. European Council for an Energy Efficient Economy (ECEEE).
- Laurent M, Osso D, et Benoit A, (2011), Energy efficiency for all! How an innovative conditional subsidy on refurbishment could lead to enhanced access to efficient technologies. European Council for an Energy Efficient Economy (ECEEE).
- MacLeod M, Moran D, Wall E, Eory V, McVittie A, Barnes A, Rees R, (2011) Marginal Abatement Cost Curves for UK Agricultural Greenhouse Gas Emissions. Journal of agricultural economics. Volume 62. Pages 93-118.
- McKinsey & Company. (2010). "Climate Change Special Initiative Greenhouse gas abatement cost curves." Retrieved August 19th 2010, (<http://209.172.180.101/client-service/ccsi/costcurves.asp>).
- Nauleau M-L, Daussin-Bénichou J-M, Mauroux A, (2015) Les travaux de rénovation thermique dynamisés par le crédit d'impôt développement durable, Revue CGDD, la rénovation thermique du bâtiment : quels enjeux et quelles solutions?
- OSSO D, Laurent M-H, et Allibe B, (2011), Energy savings and costs of energy efficiency measures: a gap from policy to reality?. European Council for an Energy Efficient Economy (ECEEE).
- OSSO D, Laurent M-H, Allibe B, Cayre E, (2011), There are people in the house! How the results of purely technical analysis of residential energy consumption are misleading for energy policies, European Council for an Energy Efficient Economy (ECEEE).
- Schroten A, Warringa G, et Bles M, (2012) Marginal abatement cost curves for Heavy Duty Vehicles, CE Delft, Pages 2-42.

- Stolyarova H, OSSO D, et Benoit A, (2015), Stated Preferences for Space Heating Investment, EDF R&D.
- Van Vuuren D-P, de Vries B, Eickhout B, and Kram T, (2004), Responses to technology and taxes in a simulated world, Energy Economics, volume 26. Pages 579–601
- Wing C, et Fuk D, (2015), Les déterminants de la température de chauffage des logements : entre consensus et incertitudes, Revue CGDD, la rénovation thermique du bâtiment : quels enjeux et quelles solutions?
- Xu X, Osso D, Brunitière J-R, Laurent M-H, (2014), The residential refurbishment market far away from economic rationality: application of marginal abatement cost to the French white. European Council for an Energy Efficient Economy (ECEEE).

### Rapports

- ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie) (2013), Chiffre Bâtiment. Edition 2013.
- ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie) (2013), Guide des facteurs d'émissions, Bilan Carbone Entreprise et Collectivité.
- ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie) (2011), Synthèses de l'évaluation des travaux du crédit d'impôt au développement durables.
- Batiprix (2013), Rapport interne EDF (R&D).
- CEREN (Centre d'Etudes et de Recherches Economiques de l'Energie) (2011), Analyse rétrospective du parc et des flux de logements de 1973 à 2009, (RES/11.001, étude 0102, janvier 2011).
- CEREN (Centre d'Etudes et de Recherches Economiques de l'Energie) (2015), Analyse Recensement rénové de la population en 2006, résultats 2011 et évolution en métropole, janvier 2015).
- CEREN (Centre d'Etudes et de Recherches Economiques de l'Energie) (2015), Analyse Recensement rénové de la population en 2006, résultats 2011 et évolution en métropole, janvier 2015).
- CEREN (Centre d'Etudes et de Recherches Economiques de l'Energie) (2014), Suivi des parcs et des consommations, Etudes 4102.
- DGEC (Direction Générale de l'Energie et du Climat) (2015), Lettre d'information Certificats d'Economies d'Energie.
- ENSPOL (Energy Saving Policies and Energy Efficiency), (2015), Energy Saving Policies and Energy Efficiency Obligation Scheme, Edition 2015.
- Maugard, A. (2012), Analyse détaillée du parc résidentiel existant, Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012.

### Arrêtés

- Arrêté du 8 février 2012 modifiant l'arrêté du 15 septembre 2006 relatif au diagnostic de performance énergétique pour les bâtiments existants proposés à la vente en France métropolitaine.

### Thèses

- Allibe, B. (2012), « Modélisation des consommations d'énergie du secteur résidentiel français à long terme », Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales, CIRED.
- Giraudet, L-G. (2012), « Les instruments économiques de maîtrise de l'énergie: Une évaluation multidimensionnelle », Ecole des ponts Paris tech.

Raynaud, M. (2014), « Evaluation *ex-post* de l'efficacité de solutions de rénovation énergétique en résidentiel », Mine Paris Tech, EDF R&D.

## ***DERNIERES PARUTIONS***

- |   |      |
|---|------|
| <b>Electricité renouvelable, sécurité d’approvisionnement et marché de capacité. Une comparaison des solutions avancées des deux côtés du Rhin.</b><br>Tiphanie Fontaine                | n°42 |
| <b>Vers une mobilité bas-carbone : transfert modal ou transfert technologique ?</b><br>Lesly CASSIN   | n°41 |
| <b>Energie nette et EROI (Energy-Return-On-Investment)</b><br>Victor COURT  | n°40 |
| <b>Les risques de contre-productivité à l’usage des innovations vertes dans le bâtiment. Le cas français des chauffe-eau solaires dans l’habitat collectif</b><br>Vincent RENAULD-GIARD | n°39 |
| <b>Taxer l’achat et/ou l’usage du véhicule : Quelle incidence de l’effet rebond ?</b><br>Bénédicte MEURISSE   | n°38 |
| <b>Une Analyse Contrefactuelle du développement des énergies Renouvelables</b><br>Marc BAUDRY et Clément BONNET   | n°37 |

Nos publications sont disponibles sur le site [chaireconomieduclimat.org](http://chaireconomieduclimat.org)